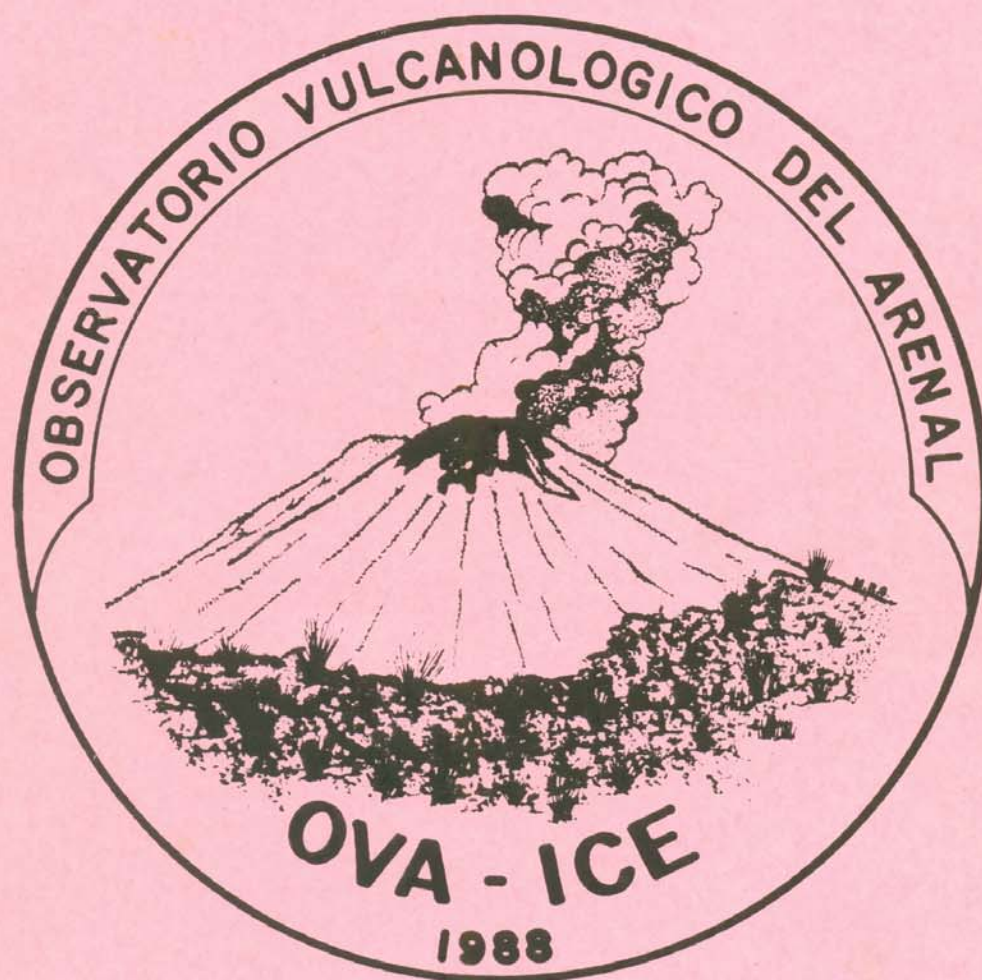


**DIRECCION DE PLANIFICACION ELECTRICA**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

# **BOLETIN DEL**



**AÑO 3, N°6, DICIEMBRE 1990 — SAN JOSE , COSTA RICA**

**ISSN 1015-4396**

DIECCION DE PLANIFICACION ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

BOLETIN DEL OBSERVATORIO  
VULCANOLOGICO DEL ARENAL

Editores: Geól. Rafael Barquero

Geól. Gerardo Soto

Geól. Guillermo Alvarado

AÑO 3, Nº 6, DICIEMBRE 1990 - SAN JOSE, COSTA RICA

ISSN 1015-4396

## II

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO DEL ARENAL (O V A ) \*  
Oficina de Sismología y Vulcanología  
Departamento de Geología  
Instituto Costarricense de Electricidad  
Apdo 10032 - 1000, SAN JOSE, COSTA RICA

### Telefonos

(506) 20-7741  
(506) 20-7686

Telex (376) 2140

Fax (506) 31-47-44

El Observatorio Vulcanológico del Arenal (OVA) es parte de la Oficina de Sismología y Vulcanología del Departamento de Geología del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), la cual conjuntamente con la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología constituyen la RED SISMOLOGICA NACIONAL (RSN ICE-UCR)

### Personal profesional del ICE

- 1- Geól Guillermo Alvarado. Geovulcanología y Neotectónica
- 2- Ing Elec José Miguel Barrantes. Electrónica
- 3- Geól. Rafael Barquero. Sismología
- 4- Geól Ileana Boschini. Sismología
- 5- Ing Carlos Cordero. Geodesia
- 6- Lic José F Fernández. Química
- 7- Geól. Carlos Leandro, Gravimetría y Magnetometría
- 8- Geól Gerardo Soto, Geología

### Personal técnico y de apoyo

- Francisco Arias
- Guido Calvo
- Manuel Gutiérrez
- Rigoberto Torres

\* Miembro de la World Organization of Volcano Observatories (WOVO)

### III

Equipo y técnicas de auscultación

Estaciones sismográficas telemétricas permanentes.

| Estación | Código | Lat N     | Long W    | Elevac | Dist    | Volcan |
|----------|--------|-----------|-----------|--------|---------|--------|
| FORTUNA  | FOR    | 10°28,00' | 84°41,52' | 500 m  | 04,0 km | al E   |
| CHIRIPA  | AR6    | 10°26,38' | 84°54,63' | 1020 m | 22,2 km | al W   |

Estaciones sismográficas portátiles MQ-800, seis

Red de ocho inclinómetros secos instalados en forma radial alrededor del volcán

Laboratorio Químico.

Distanciómetro electrónico (EDM)

Red de diez estaciones para muestreo geoquímico de fuentes termales y frías

Red de hitos para medidas gravimétricas y otras técnicas geofísicas

Periódicamente se realizan visitas de observación para conocer la dinámica del volcán y detectar cualquier situación anormal

#### IV

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO DEL ARENAL (O V A.) \*  
Oficina de Sismología y Vulcanología  
Departamento de Geología  
Instituto Costarricense de Electricidad  
Apdo 10032 - 1000, SAN JOSE, COSTA RICA

Telephones:

(506) 20-7741

(506) 20-7686

Telex: (376) 2140

Fax: (506) 31-47-44

The Observatorio Vulcanológico del Arenal (OVA) is part of the Office of Seismology and Volcanology of the Department of Geology of the Costa Rican Institute of Electricity which, together with the Section of Seismology, Volcanology and Geophysics Exploration of the Central American School of Geology constitute the NATIONAL SEISMOLOGICAL NETWORK (RSN-ICE-UCR)

Professional staff of ICE:

- 1- Geól Guillermo Alvarado, Geovulcanology and Tectonics
- 2- Eng. José Miguel Barrantes, Electronics
- 3- Geól Rafael Barquero, Seismology
- 4- Geól Ileana Boschini, Seismology
- 5- Eng Carlos Cordero, Geodesy
- 6- Lic José F. Fernández, Chemistry
- 7- Geól Carlos Leandro, Gravimetry and Magnetometry
- 8- Gerardo Soto, Geology

Technical and auxiliary staff:

- Francisco Arias
- Guido Calvo
- Rigoberto Torres
- Manuel Gutiérrez

\* Member of the World Organization of Volcano Observatories (WOVO)

Equipment and monitoring technics.

Permanent telemetric seismographic stations.

| Station | Code | Lat N     | Long W    | Elevat | Dist volcano |
|---------|------|-----------|-----------|--------|--------------|
| FORTUNA | FDR  | 10°28 00' | 84°41 52' | 500 m  | 04 0 Km E    |
| CHIRIPA | AR6  | 10°26 38' | 84°54 63' | 1020 m | 22 2 Km W    |

Portable seismographic stations MQ-800, six

Network of 8 dry-tilt stations located radially around the volcano

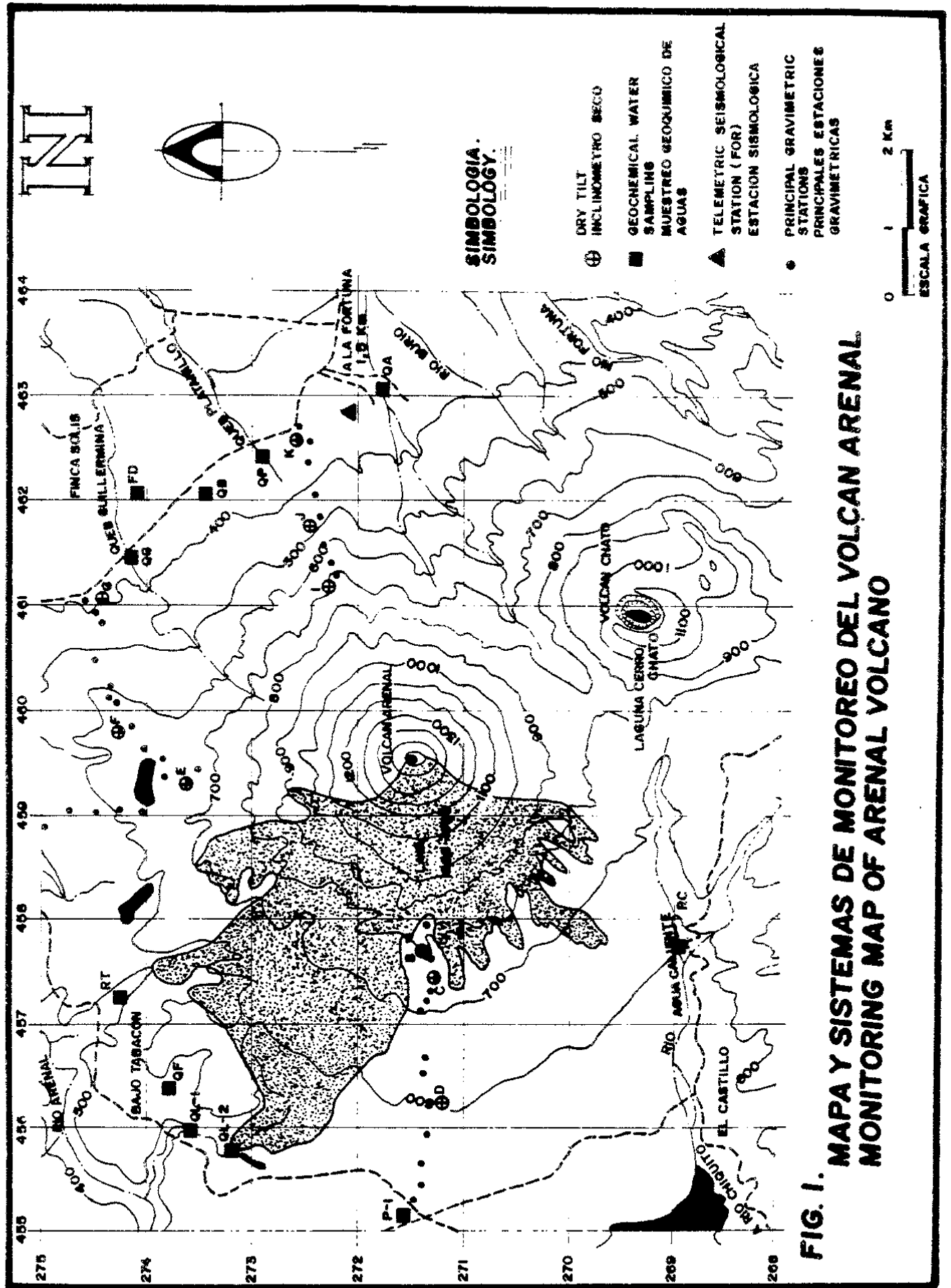
Chemistry laboratory.

Electronic Distance Meter (EDM)

Ten station network for geochemical monitoring of cool and hot springs

Network of stations for gravimetric and magnetometric measurements

Field observations are carried out periodically in order to know about the volcano dynamics and to detect any abnormal phenomena



## CONTENIDO:

Pág.

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Barquero, R.; Soto, G.E.: Informe de la actividad del volcán Arenal Período julio-diciembre 1990                                          | 01 |
| Rothery, D.; Oppenheimer, C.: Combining Landsat TM infrared data with an air photograph of an eruption of Volcán Arenal (6 February 1986) | 04 |
| Marini, L.; Guidi, M.; Fernández, J.F.; Barquero, R.: Análisis geoquímico de las fuentes termales y frías del Volcán Arenal               | 09 |



**INFORME DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN ARENAL  
PERIODO JULIO - DICIEMBRE 1990**

**Geól. Rafael Barquero**  
**Geól. Gerardo Soto**

**Julio:** Continué la actividad estromboliana y efusiva con exhalación abundante de vapor y gases. Las coladas de bloques que se observaron en junio continuaron descendiendo principalmente por el flanco NW. El número de sismos volcánicos se mantuvo a un promedio de 20 diarios, similar al mes anterior. Se observó sin embargo, aumento importante en los temblores que parece estar relacionado con la actividad exhalativa vigorosa en el cráter superior (C).

**Agosto:** Continué la actividad estromboliana y fumarólica en la cuspide así como los flujos de lava blocosa. Según los registros en la estación "FOR" hubo un promedio de 24 eventos diarios con un máximo de 41 el día 12 de agosto. Entre los días 17 y 21 hubo un registro bastante continuo de temblores, debidos a desgaseificación. La actividad explosiva se incrementó desde el día 22 hasta finales del mes. Las columnas de ceniza y gases observados alcanzaban cerca de 1 km de altura.

**Setiembre:** Actividad fumarólica, explosiones estrombolianas y efusión de lavas continuaron. Entre los días 8 y 9 de setiembre el promedio de explosiones era de 1/hora hasta un máximo de 63 el día 18. El promedio de la última quincena fue de 40 eventos diarios. La actividad de temblores mostró un incremento a partir del día 27, registrándose periodos continuos de hasta 10 horas de duración.

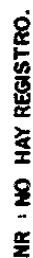
**Octubre:** Desde la cúspide del cráter C se desprenden abundantes gases de color blanco (vapor de agua) y azulado (colorados ? sulfatados ?) que son desviados principalmente hacia el oeste por los vientos predominantes. La actividad estromboliana continuó, proyectando columnas eruptivas de poco más de 1 km sobre el cráter. A finales del mes se observaron dos coladas de lava en bloques movilizándose hacia el NW y SW. Entre los días 12 y 15, lluvias intensas (entre 54 y 77 mm, en lapsos entre 2 y 5 horas) dispararon crecidas moderadas en los ríos Calle de Arena y Chato, en donde previamente han fluído lahares.

La actividad sísmica registrada se ha mantenido a un nivel normal con un promedio de 20 eventos; también se observa periódicamente actividad por varias horas que se asocia a la exhalación de vapor, gases y al ascenso del magma.

**Noviembre:** Se mantuvo actividad estromboliana normal pero con pocas explosiones diarias, hubo exhalación de gases y vapor en gran cantidad y pequeñas pero constantes efusiones de lava en bloques que descendieron principalmente por los flancos NW, E y SW del aparato volcánico.

**Diciembre:** La actividad explosiva se mantuvo a un nivel bajo o normal y el nivel de eventos sísmicos se redujo a un promedio de 10 eventos por día.

## 0061



**July**

**Combining Landsat TM infrared data with an air photograph of an eruption of Volcán Arenal (6 February 1986)**

David Rothery, Clive Oppenheimer

(Dept of Earth Sciences, The Open University, Milton Keynes, MK7 6AA, England)

and Lori Glaze

(Jet Propulsion Laboratory, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, California 91109, USA)

**Abstract**

We report the first ever near-simultaneous observations of an erupting volcano by conventional aerial photography and short wavelength infrared imagery from a satellite. The data are of interest in illustrating the eruptive style, and also allow comparison between the quality of information recorded at different wavelengths and with different resolution.

Since 1974 Arenal has been in an eruptive phase characterised by summit explosive activity and generation of blocky flows and small nuées ardentes (Alverado and Barquero, 1987; Barquero, 1989; GVN, 1990). Since 1984 the activity has been mostly strombolian-effusive (R. Barquero, pers. comm. 1990). We have obtained a Landsat Thematic Mapper (TM) image of Arenal that was recorded on the morning of 6 February 1986, which shows the hot strombolian vent (ca 250m to the west of the summit crater) and an active lava flow descending down the southwest flank of the volcano, from a source near the strombolian vent.

The vent and the flow are prominent on the TM image because they are hot enough to radiate thermally in the two short wavelength infrared (SWIR) channels recorded by the TM; band 7 (2.08-2.35  $\mu\text{m}$ ) and band 5 (1.55-1.75  $\mu\text{m}$ ). The principles behind the measurement of SWIR radiance from volcanoes are discussed in Rothery *et al.* (1988) and Glaze *et al.* (1989) and an example of the use of these data to measure properties of an active lava flow is given by Pieri *et al.* (1990).

We are fortunate that there was a conventional black and white panchromatic aerial photograph run performed by the Instituto Geografico Nacional that obtained a photograph (39417 R234 L-1) at 09.46 local time on the same day, less than 30 minutes from the time of recording of the TM image. We have digitized this aerial photograph and used this as a base onto which we resampled the TM data, using digital image processing techniques. The results are shown in Figures 1 and 2. Note that the TM image has pixels that are 30m across, which is much coarser resolution than the aerial photograph (resolution less than 1m), but whereas the lava flow appears dark on the aerial photograph it appears bright in TM bands 5 and 7, thus demonstrating that it was hot, and distinguishing it from the cold, non-active flows that occur elsewhere in the image. The aerial photograph shows that the active flow is confined between the levées of a previous, wider flow. Note also that the flow is in two separate pulses; there is a very hot length of flow near the source and a detached hot region further down-slope. Discussion with Guillermo Alvarado (pers. comm. 1990) lead us to interpret this as a reactivation of a previous pulse of lava by the weight of a fresh effusion of lava above. It is possible that temperature information derived from the TM data would allow the rheological properties of this flow to be quantified.

Landsat TM data are very expensive (ca\$2000 US for a digital tape covering 90km by 90km), but we hope that future satellites will provide data at a price that enables short wavelength infrared images to be used as a frequent monitoring tool.

Alvaradao, G. & Barquero, R. 1987. Las señales sísmicas del Volcán Arenal (Costa Rica) y su relación con las fases eruptivas (1986-1986), *Ciencia y Tecnología*, **11**, 15-35

Barquero, R. 1989, Resumen de la actividad del Volcán Arenal periodo enero-diciembre 1989, *Boletín del Observatorio Volcanológico del Arenal*, Año 2, No. 4, 5-6.

Glaze, L S, Francis and Rothery, D A (1989) Measuring thermal budgets of active volcanoes, *Nature* **338**, 144-146

GVN, 1990. Arenal, *Bulletin of the Global Volcanism Network*, **15**(9), 3.

Pieri, D C, Glaze, L S and Abrams, M J (1990) Thermal radiance observations of an active lava flow during the June 1984 eruption of Mount Etna, *Geology*, **18**, 1018-1022.

Rothery, D A, Francis, P W and Wood, C A (1988) Volcano monitoring using short wavelength infrared data from satellites, *Journal of Geophysical Research*, **93**, 7993-8008

Figure 1: Part of Volcán Arenal, 1.5 km across. This is a black and white version of a coloured image, which had the aerial, photograph displayed in blue, TM band 5 multiplied by the aerial photograph in green, and TM band 7 multiplied by the aerial photograph in blue. See Figure 2 caption for discussion.

Figure 2: A close up of part of Figure 1. The original Landsat TM pixels (30m by 30m) are indicated by the square pattern. The lava strombolian vent is at the top and the active lava flow extends downwards and slightly to the left, as shown by the bright, thermally

radiant area caused by the high temperature of the surfaces. The true width of the active lava flow is about 20m, as shown by the dark area within the bright thermal anomaly, demonstrating that the thermal signal is somewhat blurred by the TM.

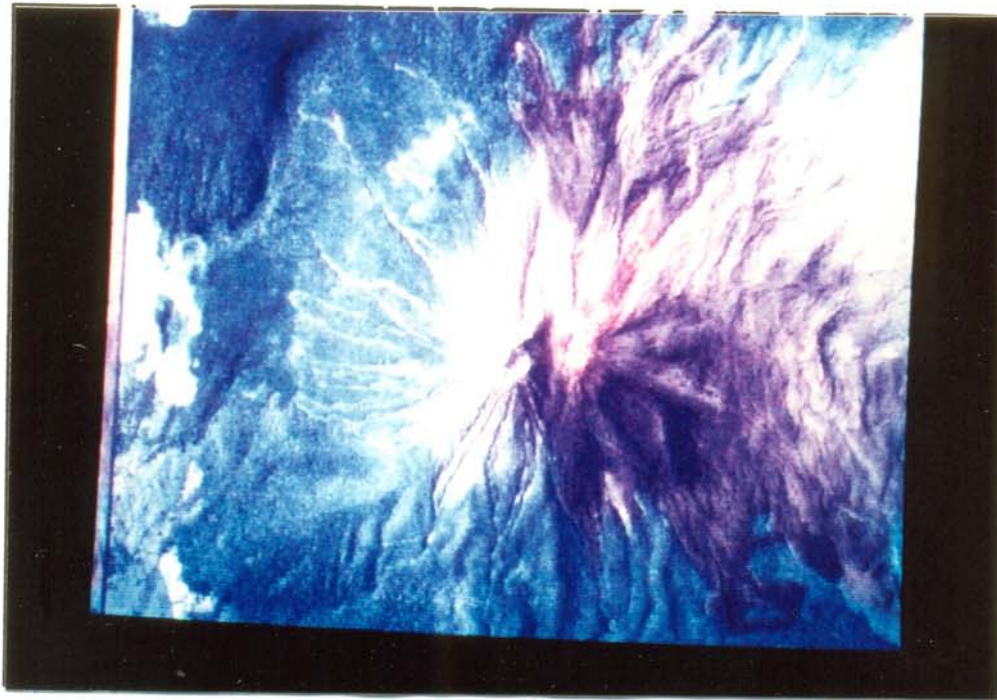


FIGURE No 1



FIGURE No 2



Bol. Obs. Vulc. Arenal 3(6):9-27

# ANÁLISIS GEOQUÍMICO DE LAS FUENTES TERMALES Y FRÍAS DEL VOLCÁN ARENAL

Luigi Marini  
Massimo Guidi  
Geotermica Italiana Srl  
José F. Fernández  
Laboratorio Químico del ICE  
Rafael Barquero  
Oficina de Sismología y Vulcanología ICE

## ABSTRACT:

104 hydrogeochemical analyses from 13 different sites around Arenal volcano have been processed, selecting the best quality. The Arenal thermal springs have a chloride-sodium composition of high saline content and their chemical characteristics indicate a deep source. Based on the Na/K geothermometer an equilibrium temperature of 57°C has been estimated. However the K2/Mg geothermometer and the calcite solubility suggest that the deep Na-Cl hydrothermal mixes with shallower waters and re-equilibrates at lower T, possibly of 120-155°C or so. All the water samples have similar isotopic character and are very heavy, indicating a Caribbean precedence. The changes in ionic solution behavior variations in the thermodynamic condition of the hydrothermal aquifer at depth and have no direct relation with geomorpho-volcanic activity variations.

## Introducción.

Las aguas que circulan en las cercanías del Volcán Arenal han sido objeto de estudios hidrogeoquímicos. En el Arenal se llevan una vigilancia del volcán activo, para evaluar el potencial geotérmico del área. La Oficina de Sismología y Vulcanología del ICE ha emprendido un campaña de muestreo geoquímico desde 1985 realizada por Barquero (R. 1989), a ello se suman los trabajos previos o contemporáneos de Rigot et al. (1982), Rigot & Barquero (1984), GLE-REIL (1984).

Todos estos datos hidrogeoquímicos han sido analizados y evaluados en el curso del presente trabajo, cuyos objetivos abarcan también recomendaciones sobre el monitoreo geoquímico del Arenal.

## Calidad de los datos:

Un conjunto de 104 análisis hidrogeoquímicos, representativos de 13 diferentes sitios de muestreo ha sido procesado. Para cada análisis las sumas de las concentraciones

(expresadas en eq/l) de los cationes y de los aniones han sido comparadas entre sí. Los análisis con una desviación porcentual mayor de 10 % han sido excluidos, obteniendo un grupo de 62 análisis, aparentemente de buena calidad (Tabla 1), que han sido considerados en las etapas interpretativas siguientes.

En la tabla 1 (excluyendo las muestras 72 y 73 que se refieren a dos fuentes frías estudiadas por ICE-ENEL (1989) las muestras están identificadas por números de 3 o 4 cifras. Las últimas dos se refieren al autor como sigue:

00 = Bigot S (1986) y Bigot S & Barquero J (1986)  
de 01 a 14 = Barquero R (1989)  
98 y 99 = ICE-ENEL (1989)

La primera cifra identifica el sitio de muestreo como sigue:

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| 1 Quebrada Platahillo  | 7 Río Tabacón             |
| 2 Río Agua Caliente    | 8 Quebrada Lava           |
| 3 Quebrada Palma       | 9 Quebrada Calle de Arena |
| 4 Quebrada Guillermina | 10 Quebrada Fria          |
| 5 Fuente Doris         | 11 Pozo 1                 |
| 6 Quebrada Tabacón     |                           |

En los diagramas de los apartados siguientes símbolos gráficos identifican los diferentes sitios de muestreo según lo siguiente:

Quebrada Lava  
o Río Tabacón Quebrada Tabacón  
0 Fuente Doris  
X Quebrada Fria  
+ Otros sitios

#### Clasificación química de las aguas:

Entre las metodologías para la clasificación química de las aguas, la más apta para fines geoquímicos es la de Langier y Ludwig (1942), que se definirá como "LL" en este trabajo.

Los diagramas cuadrangulares de LL representan las bases de pirámides, cuyo eje es el de la salinidad. Estos diagramas relacionan los constituyentes disueltos entre sí, a pesar del contenido salino total. Se consideran 3 diagramas cuadrangulares de LL que se construyen cambiando el anión aislado y manteniendo la misma reagrupación entre los cationes (Na+K y Ca+Mg).

El contenido salino total es tomado en cuenta por medio de las secciones triangulares comprendidas entre las aristas de las pirámides de LL.

| Ca       | Mg       | Na       | K        | Alk      | SD4      | Cl       | SiO2     | pH   | T    | F        | Li           |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|----------|--------------|
| eq/l     | eq/l     | eq/l     | eq/l     | eq/l     | eq/l     | eq/l     | mol/l    |      | °C   | mol/l    | mol/l        |
| 1.09E-03 | 4.52E-04 | 3.75E-04 | 8.37E-05 | 1.55E-03 | 1.67E-04 | 3.38E-04 | 9.57E-04 | 6.33 | 23.1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 72  |
| 9.48E-04 | 1.27E-03 | 5.35E-04 | 1.20E-04 | 2.41E-03 | 2.00E-04 | 2.06E-04 | 1.08E-03 | 6.68 | 24.8 | 1.16E-05 | 0.00E+00 73  |
| 6.19E-04 | 1.60E-04 | 2.10E-04 | 3.99E-05 | 8.60E-04 | 2.00E-05 | 9.98E-05 | 0.00E+00 | 7.11 | 23.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 100 |
| 4.94E-04 | 1.81E-04 | 2.78E-04 | 3.38E-05 | 7.72E-04 | 4.79E-05 | 7.36E-05 | 9.87E-04 | 6.91 | 22.3 | 4.21E-06 | 0.00E+00 109 |
| 4.93E-04 | 1.85E-04 | 2.48E-04 | 4.17E-05 | 8.52E-04 | 3.58E-05 | 9.39E-05 | 9.32E-04 | 7.25 | 0.0  | 5.26E-06 | 0.00E+00 111 |
| 7.39E-04 | 2.80E-04 | 2.10E-04 | 3.99E-05 | 1.13E-03 | 2.00E-05 | 9.98E-05 | 0.00E+00 | 7.83 | 19.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 200 |
| 5.99E-04 | 2.06E-04 | 2.17E-04 | 3.32E-05 | 9.18E-04 | 2.91E-05 | 8.18E-05 | 8.82E-04 | 8.08 | 0.0  | 0.00E+00 | 0.00E+00 210 |
| 4.89E-04 | 1.56E-04 | 1.96E-04 | 3.07E-05 | 7.54E-04 | 2.50E-05 | 8.46E-05 | 7.16E-04 | 7.56 | 0.0  | 0.00E+00 | 0.00E+00 211 |
| 5.14E-04 | 2.06E-04 | 2.57E-04 | 4.60E-05 | 1.02E-03 | 1.31E-05 | 9.59E-05 | 8.75E-04 | 7.40 | 0.0  | 0.00E+00 | 0.00E+00 213 |
| 5.74E-04 | 1.75E-04 | 2.34E-04 | 2.81E-05 | 9.21E-04 | 1.98E-05 | 9.56E-05 | 7.72E-04 | 7.55 | 0.0  | 3.16E-06 | 0.00E+00 214 |
| 1.24E-03 | 6.20E-04 | 3.70E-04 | 6.01E-05 | 2.02E-03 | 1.20E-04 | 1.60E-04 | 0.00E+00 | 7.87 | 22.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 300 |
| 1.98E-03 | 1.72E-03 | 7.48E-04 | 1.40E-04 | 3.80E-03 | 3.81E-04 | 2.90E-04 | 0.00E+00 | 7.64 | 24.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 400 |
| 1.69E-03 | 1.73E-03 | 7.87E-04 | 1.35E-04 | 3.41E-03 | 5.50E-04 | 1.71E-04 | 1.25E-03 | 8.12 | 23.1 | 1.37E-05 | 2.88E-06 409 |
| 1.80E-03 | 1.89E-03 | 8.26E-04 | 1.84E-04 | 3.54E-03 | 6.04E-04 | 2.59E-04 | 1.31E-03 | 8.66 | 0.0  | 1.00E-05 | 4.32E-06 410 |
| 1.60E-03 | 1.89E-03 | 1.00E-03 | 2.07E-04 | 3.61E-03 | 6.66E-04 | 3.10E-04 | 1.26E-03 | 8.36 | 0.0  | 1.21E-05 | 2.88E-06 411 |
| 1.28E-03 | 1.64E-03 | 7.96E-04 | 9.72E-05 | 3.26E-03 | 5.56E-04 | 3.10E-04 | 1.32E-03 | 8.60 | 0.0  | 1.00E-05 | 1.44E-06 413 |
| 1.59E-03 | 1.54E-03 | 7.74E-04 | 9.59E-05 | 3.31E-03 | 6.06E-04 | 2.31E-04 | 1.13E-03 | 8.00 | 0.0  | 1.47E-05 | 2.88E-06 414 |
| 4.24E-03 | 4.60E-03 | 4.57E-03 | 5.19E-04 | 5.16E-03 | 5.08E-03 | 3.84E-03 | 0.00E+00 | 6.27 | 39.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 500 |
| 3.16E-03 | 4.01E-03 | 5.59E-03 | 4.99E-04 | 6.54E-03 | 5.10E-03 | 2.20E-03 | 1.80E-03 | 6.57 | 0.0  | 0.00E+00 | 8.65E-06 501 |
| 2.97E-03 | 4.28E-03 | 5.44E-03 | 4.88E-04 | 6.57E-03 | 4.64E-03 | 2.14E-03 | 1.70E-03 | 7.24 | 37.5 | 0.00E+00 | 7.20E-06 502 |
| 3.81E-03 | 4.85E-03 | 6.44E-03 | 5.93E-04 | 7.28E-03 | 6.68E-03 | 2.90E-03 | 2.01E-03 | 0.00 | 42.0 | 0.00E+00 | 1.30E-05 504 |
| 3.06E-03 | 4.31E-03 | 6.18E-03 | 6.14E-04 | 8.65E-03 | 1.77E-03 | 2.79E-03 | 2.00E-03 | 6.57 | 42.1 | 0.00E+00 | 1.30E-05 506 |
| 3.93E-03 | 4.52E-03 | 5.39E-03 | 6.16E-04 | 6.83E-03 | 5.56E-03 | 2.80E-03 | 2.05E-03 | 6.59 | 42.0 | 1.68E-05 | 1.30E-05 507 |
| 3.14E-03 | 4.61E-03 | 6.26E-03 | 6.14E-04 | 6.00E-03 | 5.29E-03 | 2.31E-03 | 2.05E-03 | 6.51 | 0.0  | 1.26E-05 | 1.30E-05 508 |
| 3.14E-03 | 4.61E-03 | 5.57E-03 | 6.14E-04 | 5.93E-03 | 5.56E-03 | 2.74E-03 | 1.90E-03 | 6.65 | 0.0  | 1.58E-05 | 1.15E-05 509 |
| 2.29E-03 | 4.63E-03 | 6.00E-03 | 5.93E-04 | 6.19E-03 | 5.00E-03 | 2.99E-03 | 2.01E-03 | 6.50 | 0.0  | 0.00E+00 | 1.01E-05 511 |
| 2.70E-03 | 4.11E-03 | 4.83E-03 | 4.86E-04 | 5.74E-03 | 4.50E-03 | 2.25E-03 | 1.93E-03 | 6.50 | 0.0  | 1.95E-05 | 1.01E-05 512 |
| 2.75E-03 | 3.64E-03 | 4.08E-03 | 4.19E-04 | 5.28E-03 | 3.52E-03 | 1.66E-03 | 1.90E-03 | 6.57 | 37.9 | 1.42E-05 | 7.35E-06 599 |
| 8.58E-03 | 7.40E-03 | 6.83E-03 | 3.99E-04 | 7.92E-03 | 1.94E-03 | 1.23E-02 | 0.00E+00 | 6.57 | 24.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 600 |
| 7.53E-03 | 6.50E-03 | 1.09E-02 | 6.11E-04 | 7.10E-03 | 9.41E-03 | 1.04E-02 | 0.00E+00 | 6.35 | 48.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 700 |
| 6.75E-03 | 8.55E-03 | 7.54E-03 | 5.04E-04 | 8.31E-03 | 5.43E-03 | 1.09E-02 | 1.88E-03 | 8.23 | 0.0  | 0.00E+00 | 7.20E-06 701 |
| 6.30E-03 | 8.95E-03 | 8.07E-03 | 5.17E-04 | 9.14E-03 | 6.25E-03 | 1.03E-02 | 1.79E-03 | 8.11 | 0.0  | 0.00E+00 | 5.76E-06 702 |
| 6.45E-03 | 8.22E-03 | 1.19E-02 | 4.04E-04 | 8.81E-03 | 5.00E-03 | 1.10E-02 | 1.73E-03 | 8.40 | 0.0  | 0.00E+00 | 5.76E-06 703 |
| 6.29E-03 | 8.96E-03 | 8.39E-03 | 6.32E-04 | 9.14E-03 | 5.58E-03 | 1.09E-02 | 1.78E-03 | 8.35 | 35.6 | 0.00E+00 | 7.20E-06 704 |
| 6.89E-03 | 1.00E-02 | 1.24E-02 | 7.83E-04 | 7.06E-03 | 9.72E-03 | 1.62E-02 | 2.35E-03 | 6.34 | 49.0 | 2.53E-05 | 1.44E-05 709 |
| 6.84E-03 | 9.95E-03 | 1.12E-02 | 5.88E-04 | 7.54E-03 | 5.70E-03 | 1.27E-02 | 2.03E-03 | 8.26 | 0.0  | 1.79E-05 | 1.01E-05 710 |
| 6.59E-03 | 8.80E-03 | 8.18E-03 | 6.37E-04 | 2.84E-03 | 4.27E-03 | 1.72E-02 | 1.93E-03 | 8.15 | 0.0  | 2.11E-05 | 1.01E-05 712 |
| 6.69E-03 | 1.11E-02 | 1.47E-02 | 8.21E-04 | 7.96E-03 | 8.72E-03 | 1.90E-02 | 2.30E-03 | 6.40 | 0.0  | 0.00E+00 | 1.30E-05 713 |
| 5.94E-03 | 9.38E-03 | 1.21E-02 | 7.34E-04 | 6.65E-03 | 7.49E-03 | 1.50E-02 | 2.40E-03 | 6.38 | 48.5 | 2.42E-05 | 1.17E-05 799 |
| 1.71E-02 | 8.20E-03 | 2.61E-02 | 1.80E-03 | 7.44E-03 | 1.82E-03 | 4.57E-02 | 0.00E+00 | 6.01 | 58.0 | 0.00E+00 | 0.00E+00 800 |
| 7.87E-03 | 4.38E-03 | 9.52E-03 | 8.85E-04 | 7.28E-03 | 8.95E-04 | 1.59E-02 | 1.63E-03 | 8.15 | 0.0  | 0.00E+00 | 2.88E-06 801 |
| 6.63E-03 | 4.70E-03 | 8.05E-03 | 5.81E-04 | 7.31E-03 | 8.74E-04 | 1.25E-02 | 1.63E-03 | 8.11 | 0.0  | 0.00E+00 | 1.44E-06 803 |
| 7.93E-03 | 5.53E-03 | 9.61E-03 | 7.93E-04 | 8.31E-03 | 9.78E-04 | 1.71E-02 | 1.75E-03 | 7.92 | 36.4 | 0.00E+00 | 2.88E-06 806 |
| 7.83E-03 | 5.81E-03 | 9.96E-03 | 8.39E-04 | 8.96E-03 | 1.12E-03 | 1.70E-02 | 1.80E-03 | 7.92 | 0.0  | 0.00E+00 | 2.88E-06 807 |
| 6.54E-03 | 5.97E-03 | 8.22E-03 | 7.16E-04 | 8.39E-03 | 1.27E-03 | 1.36E-02 | 1.60E-03 | 7.89 | 35.2 | 0.00E+00 | 2.88E-06 808 |
| 7.78E-03 | 5.67E-03 | 1.10E-02 | 1.22E-03 | 5.72E-03 | 8.47E-04 | 2.02E-02 | 1.80E-03 | 7.60 | 38.3 | 2.21E-05 | 7.20E-06 809 |
| 1.13E-03 | 6.41E-03 | 1.09E-02 | 1.15E-03 | 6.69E-03 | 8.74E-04 | 1.89E-02 | 1.76E-03 | 8.11 | 0.0  | 2.47E-05 | 8.65E-06 810 |
| 1.74E-03 | 4.28E-03 | 7.09E-03 | 6.78E-04 | 5.70E-03 | 9.04E-04 | 1.12E-02 | 1.57E-03 | 7.85 | 0.0  | 3.05E-05 | 4.32E-06 814 |
| 1.16E-02 | 4.56E-03 | 2.01E-02 | 2.17E-03 | 3.74E-03 | 8.22E-04 | 3.34E-02 | 2.16E-03 | 6.73 | 58.7 | 4.42E-05 | 2.16E-05 898 |
| 1.99E-03 | 3.54E-03 | 1.13E-02 | 1.12E-03 | 3.57E-03 | 9.66E-04 | 1.87E-02 | 1.93E-03 | 6.77 | 44.5 | 2.58E-05 | 4.32E-06 899 |

. Análisis hidrogeoquímicos consideradas en la interpretación

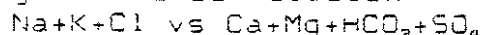
| Ca<br>eq/l | Mg<br>eq/l | Na<br>eq/l | K<br>eq/l | Alk<br>eq/l | SO4<br>eq/l | Cl<br>eq/l | SiO2<br>mol/l | pH   | T<br>C | F<br>mol/l | Li<br>mol/l |      |
|------------|------------|------------|-----------|-------------|-------------|------------|---------------|------|--------|------------|-------------|------|
| 1.13E-03   | 5.10E-04   | 3.09E-04   | 2.38E-05  | 1.87E-03    | 1.98E-05    | 5.89E-05   | 9.50E-04      | 7.51 | 23.4   | 0.00E+00   | 0.00E+00    | 908  |
| 1.15E-03   | 5.67E-04   | 3.13E-04   | 4.60E-05  | 1.85E-03    | 3.96E-05    | 1.07E-04   | 9.99E-04      | 8.11 | 0.0    | 0.00E+00   | 0.00E+00    | 909  |
| 1.14E-03   | 5.45E-04   | 3.54E-04   | 3.58E-05  | 2.00E-03    | 2.29E-06    | 1.04E-04   | 1.05E-03      | 7.95 | 0.0    | 4.21E-06   | 0.00E+00    | 912  |
| 7.73E-04   | 3.19E-04   | 2.62E-04   | 4.04E-05  | 1.25E-03    | 1.79E-05    | 7.84E-05   | 7.51E-04      | 7.30 | 0.0    | 3.16E-06   | 0.00E+00    | 913  |
| 3.87E-03   | 4.14E-03   | 2.38E-03   | 1.66E-04  | 7.62E-03    | 7.18E-04    | 2.70E-03   | 1.45E-03      | 6.51 | 0.0    | 0.00E+00   | 0.00E+00    | 1001 |
| 3.50E-03   | 4.47E-03   | 1.63E-03   | 1.59E-04  | 7.80E-03    | 7.08E-04    | 2.19E-03   | 1.43E-03      | 7.53 | 23.8   | 0.00E+00   | 0.00E+00    | 1005 |
| 3.84E-03   | 5.26E-03   | 2.00E-03   | 2.02E-04  | 7.18E-03    | 6.87E-04    | 3.30E-03   | 1.46E-03      | 7.64 | 0.0    | 6.32E-06   | 1.44E-06    | 1010 |
| 3.84E-03   | 5.35E-03   | 2.00E-03   | 1.94E-04  | 7.08E-03    | 6.66E-04    | 3.72E-03   | 1.41E-03      | 7.74 | 0.0    | 5.26E-06   | 1.44E-06    | 1011 |
| 4.47E-03   | 5.49E-03   | 2.32E-03   | 2.02E-04  | 6.92E-03    | 7.49E-04    | 4.77E-03   | 1.34E-03      | 7.60 | 0.0    | 8.95E-06   | 1.44E-06    | 1014 |
| 1.97E-03   | 1.85E-03   | 7.39E-04   | 1.56E-04  | 4.03E-03    | 5.83E-04    | 5.89E-04   | 1.15E-03      | 6.57 | 22.7   | 2.16E-05   | 0.00E+00    | 1102 |
| 2.06E-03   | 1.81E-03   | 6.87E-04   | 1.11E-04  | 3.43E-03    | 6.29E-04    | 4.91E-04   | 1.26E-03      | 6.49 | 23.2   | 1.68E-05   | 0.00E+00    | 1107 |
| 1.78E-03   | 1.49E-03   | 6.61E-04   | 1.09E-04  | 2.98E-03    | 5.23E-04    | 6.26E-04   | 1.25E-03      | 6.55 | 0.0    | 1.53E-05   | 0.00E+00    | 1112 |

## 1. Análisis hidrogeoquímicos consideradas en la interpretación

De esta manera se procesa toda la información proporcionada por los constituyentes principales (calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfato, cloruro)

#### Diagramas de LL y secciones:

El examen de los tres diagramas cuadrangulares de LL (Fig 1, 3, 3) y del diagrama de correlación



(Fig 4), equivalente a la sección NO-SE de la pirámide de LL cuya base es el diagrama cuadrangular de Fig 3) permite observar lo siguiente

1) Excluyendo la fuente de Quebrada Fria, que presenta un TDS de 20-25 meq/l) y exhibe una débil contribución de una componente clorurada, todas las demás aguas frías objeto de muestreo tienen bajo contenido salino (menor que 10 meq/l) y de composición bicarbonato alcalino térrea típica. Estas aguas proceden de circuitos someros y representan el producto de las primeras etapas de interacción entre las aguas meteoricas y las rocas, sus características reflejan en efecto el proceso de lixiviación de las rocas (disolución incongruente de fases sólidas) sin ningún vínculo de equilibrio termodinámico

2) Las muestras procedentes de la fuente termal de Quebrada Lava tienen composición cloruro sódico cálcica y contenido salino variable entre 36 y 108 meq/l. Además la componente cloruro sódica de estas aguas aumenta cuando el TDS incrementa

3) Las fuentes termales de Río Tabacón-Quebrada Tabacón se diferencian de las precedentes por un mayor contenido relativo de sulfato y de cationes alcalino térreos. El contenido salino, generalmente comprendido entre 45 y 58 meq/l, es comparable con los de la fuente termal de Quebrada Lava, pero no llega a valores tan elevados. También en este caso la componente cloruro sódica aumenta cuando el contenido salino incrementa

4) La fuente termal Doris está caracterizada por una salinidad claramente menor (21-33 meq/l) y una composición bicarbonato sulfato sódico alcalino térrea. Sin embargo, también en estas aguas se reconoce una pequeña participación de una componente cloruro sódica

Las observaciones previas sugieren que las tres fuentes termales del área del volcán Arenal descargan mezclas constituidas por una componente cloruro sódica de elevado contenido salino y una componente alcalino térrea de baja salinidad. Además, la intervención de una tercera componente rica en sulfato (o la lixiviación de sulfatos sólidos) es responsable de las desviaciones composicionales respecto a la

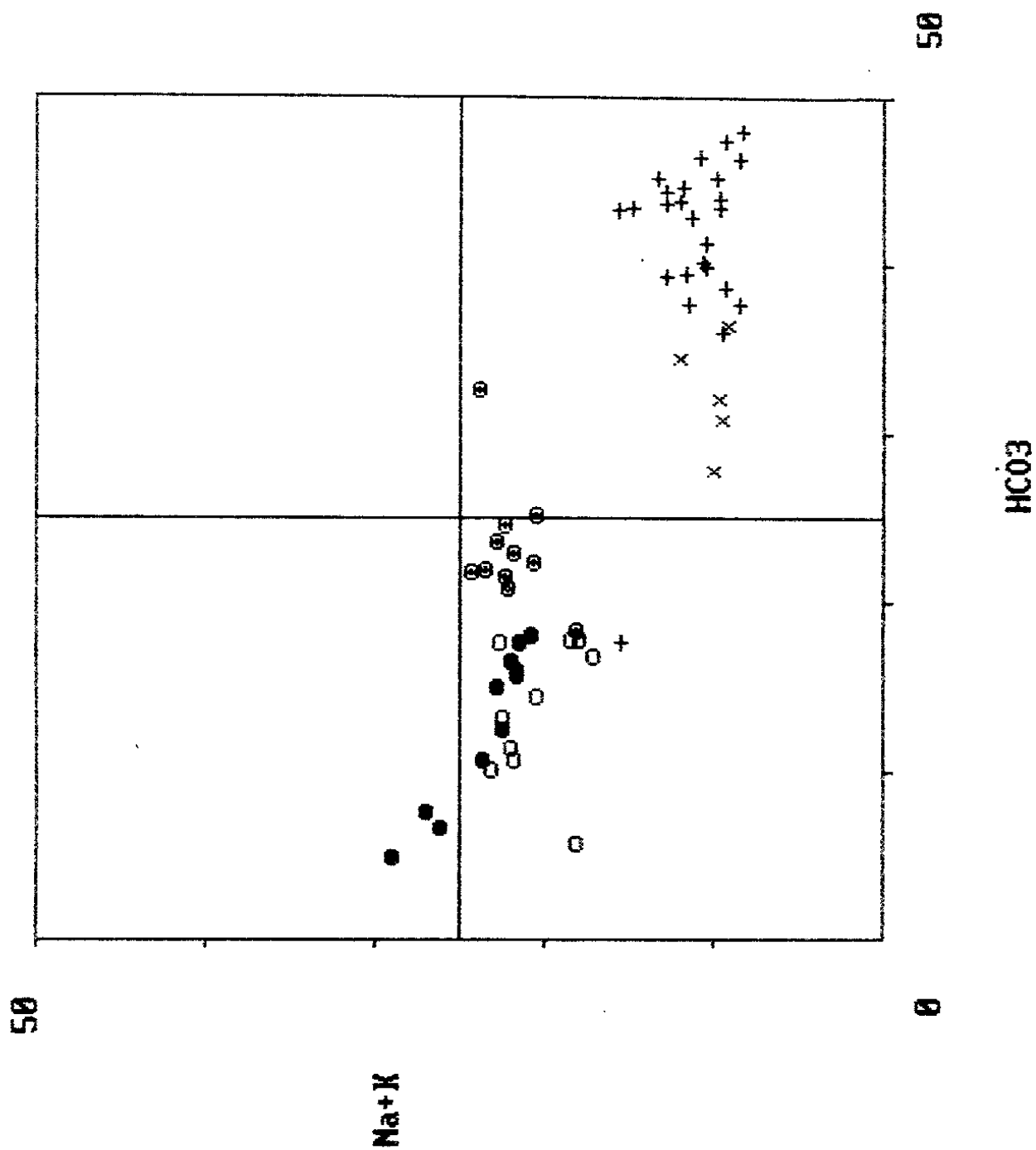


Fig. 1. Diagrama cuadrangular de LL con el bicarbonato como anión aislado

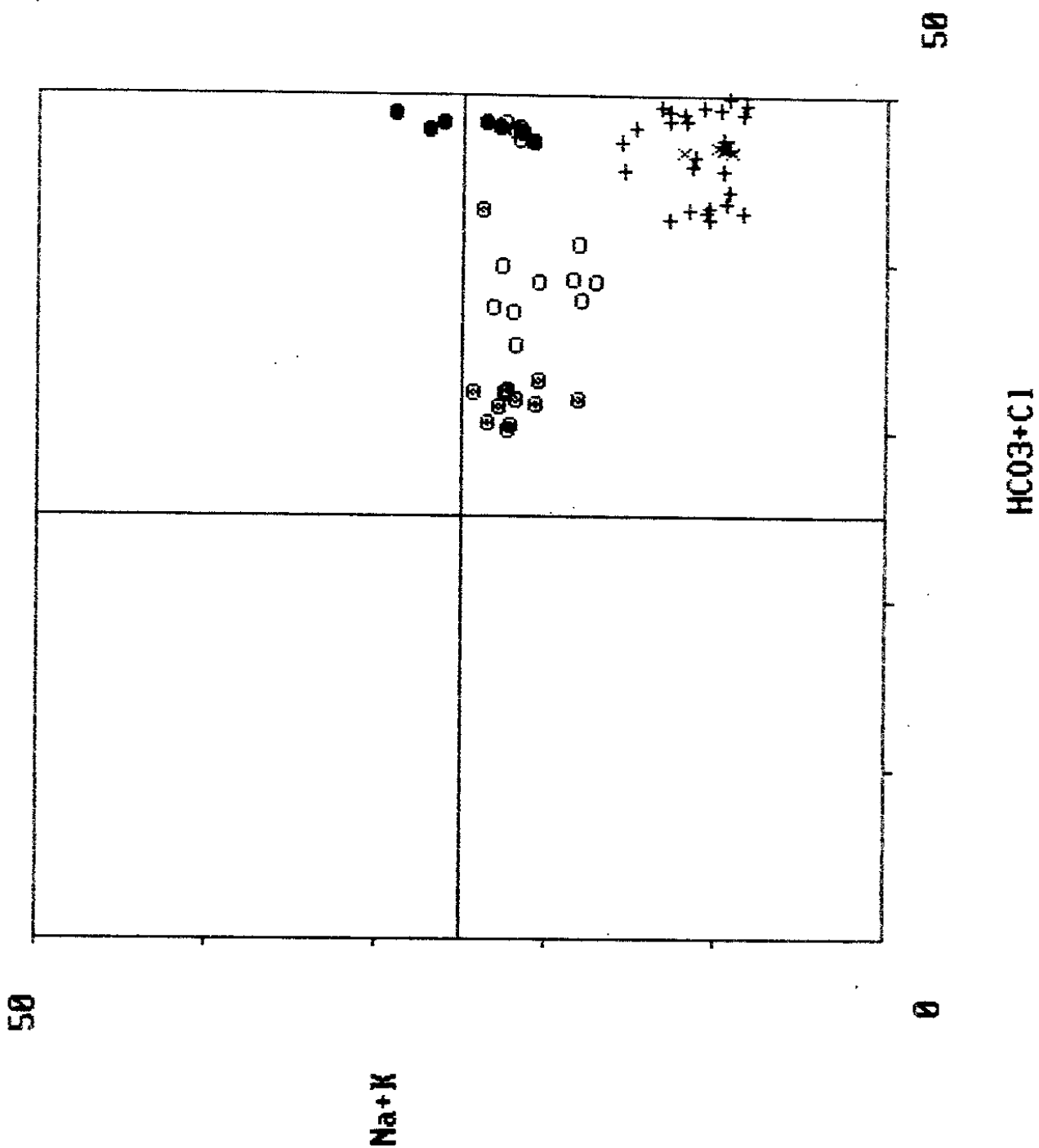


Fig. 2. Diagrama cuadrangular de LL con el sulfato como anión aislado

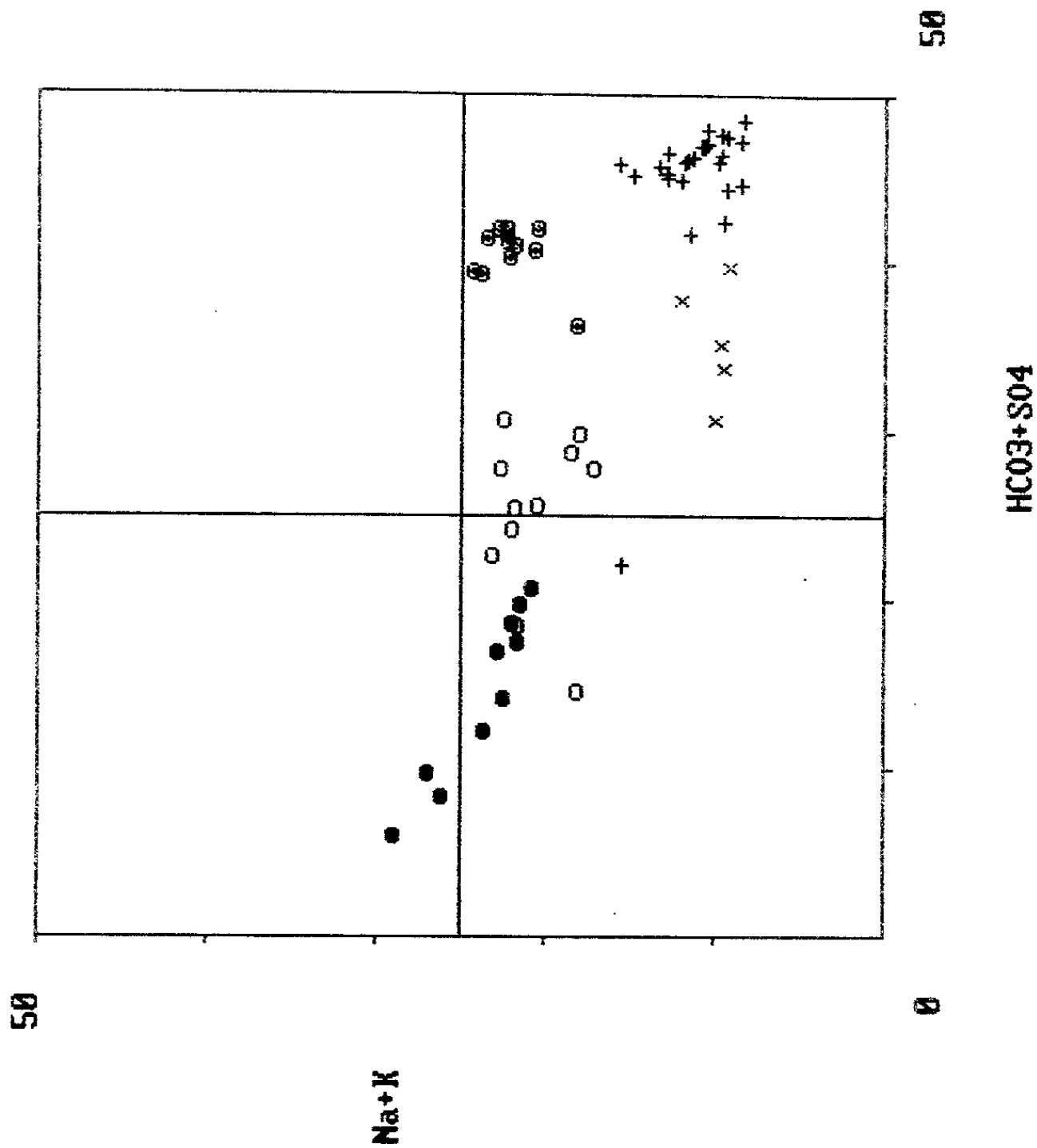


Fig. 3. Diagrama cuadrangular de LL con el cloruro como anión aislado



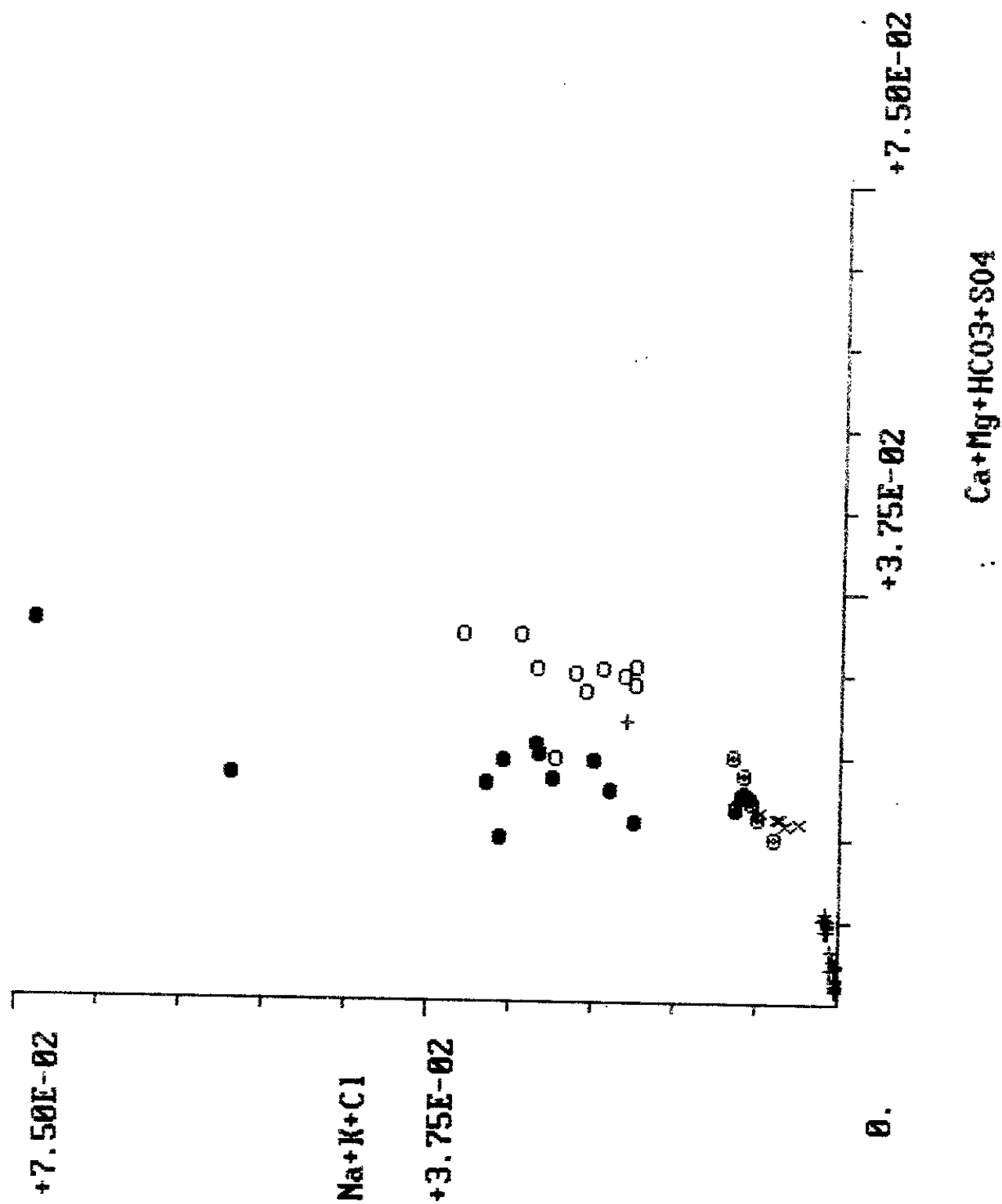


Fig. 4. Diagrama de correlación  $\text{Na}+\text{K}+\text{Cl}$  vs  $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{HCO}_3+\text{SO}_4$

línea de mezcla entre las dos componentes mencionadas arriba. Como ya es reconocido por ICE-ENEL (1989), los caracteres físico-químicos de estas aguas indican que la componente cloruro sódica presente en ellas es similar a la que procede desde reservorios hidrotermales relativamente profundos.

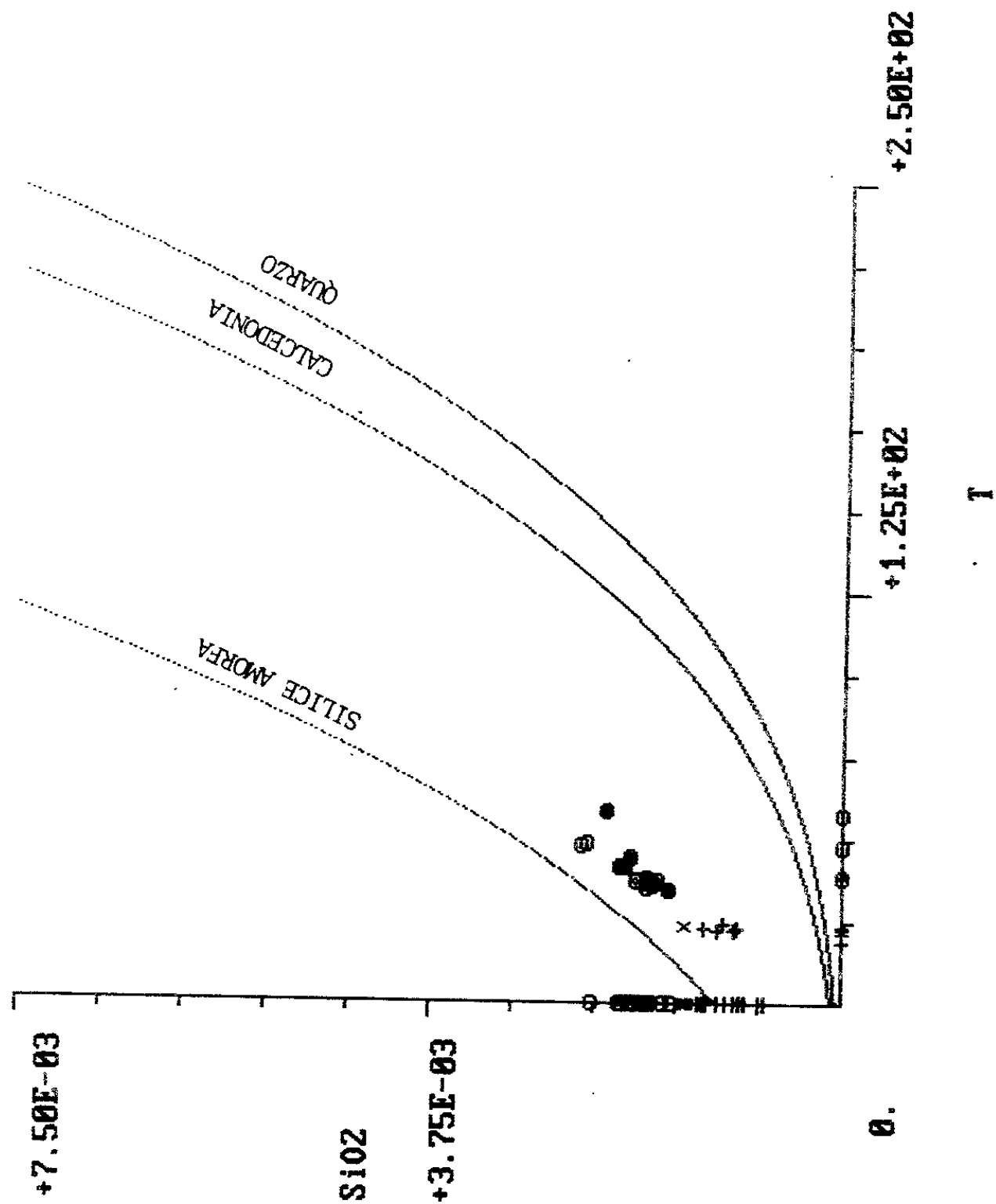
### Geotermometría hidroquímica:

Un enfoque teórico fue utilizado por Guidi et al (1990) para investigar la influencia de los fenómenos de asociación en solución acuosa sobre los geotermómetros que involucran los contenidos de los constituyentes iónicos principales (Na/K, Na-K-Ca,  $K^2/Mg$ ,  $SO_4/F^2$  y sobre el geobarómetro  $K^2/Ca$ ). Las concentraciones de los iones libres y de las especies asociadas de Na, K, Ca, Mg,  $SO_4/F$  fueron calculadas para diferentes contenidos de Cl y temperaturas, en el intervalo 150-300°C, hipotetizando la existencia de equilibrio entre la solución acuosa y la paragénesis mineralógica integrada por albita, microclina, un aluminosilicato cálcico, clorita, illita, calcedonia, anhidrita, fluorita y calcita. Después las composiciones calculadas fueron utilizadas para investigar la influencia de los fenómenos de asociación sobre los geoindicadores antes mencionados. Así se demostró que el geotermómetro Na/K es escasamente afectado, mientras que la influencia de la asociación es fuerte sobre los geotermómetros  $K^2/Mg$  y  $Ca^{1/2}/Na$  y sobre el geobarómetro  $K^2/Ca$  en los ambientes pobres en cloruro, y sobre el geotermómetro  $SO_4/F^2$ , pero en las soluciones ricas en cloruro.

Más recientemente Chiodini et al (1990) han extendido esta investigación teórica a las soluciones acuosas en equilibrio con la paragénesis mineralógica que comprende albita, microclina, un aluminosilicato cálcico o calcita, clorita, illita, cuarzo, anhidrita y fluorita, en diferentes condiciones de T,  $PCO_2$  y concentración de Cl. Así han sido obtenidas funciones que relacionan las tres variables independientes T,  $PCO_2$  y mCl con los contenidos de los constituyentes iónicos principales y con las razones que los involucran. De esta manera ha sido demostrado que solamente el Na/K y en menor medida el  $K^2/Mg$ , el  $SO_4/F^2$  y los contenidos de Mg y  $SO_4$  son geotermómetros, mientras el contenido de  $HCO_3$  y las razones que involucran el  $HCO_3$  y el Ca son geobarómetros.

### Aplicaciones:

Para las evaluaciones geotermométricas se prefiere hacer referencia a los diagramas binarios  $SiO_2$  vs temperatura (Fig 5) y K vs Mg (fig 6) y al gráfico triangular Na-K-Mg<sup>1/2</sup> (Fig 7), que permiten considerar todas las muestras conjuntamente, más bien que a los resultados numéricos de los cálculos geotermométricos (Tabla 2).

Fig. 5. Diagrama de correlación  $\text{SiO}_2$  vs temperatura

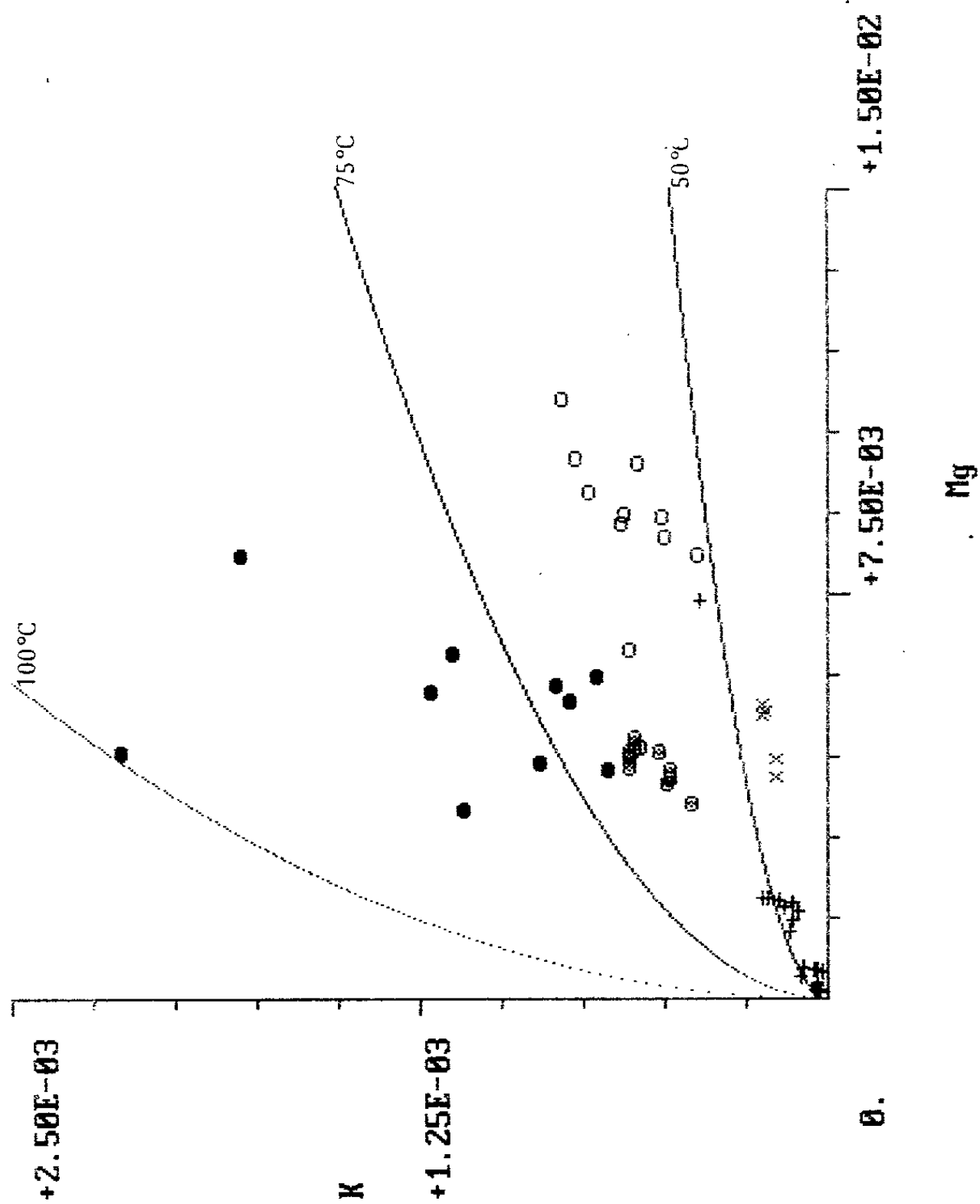
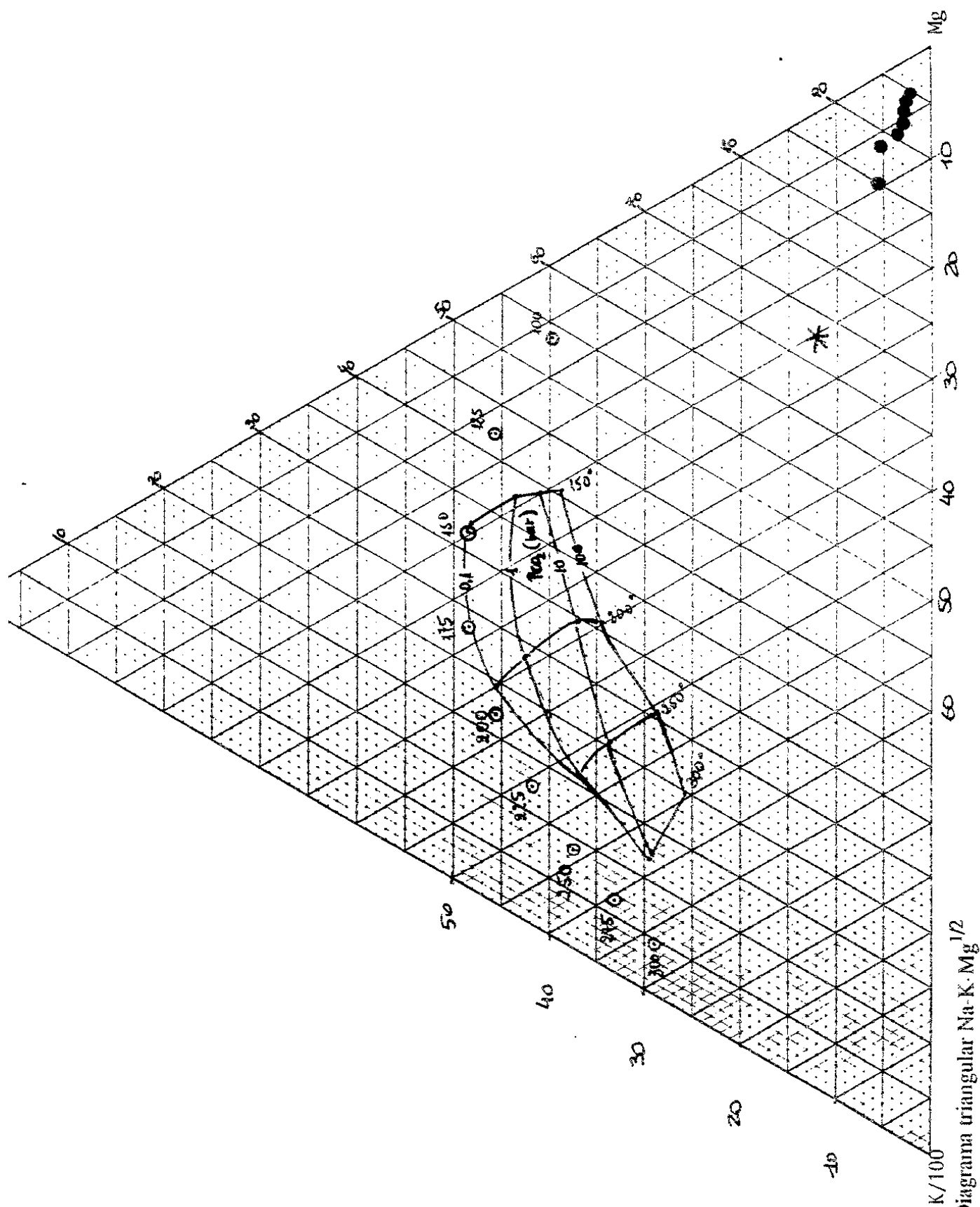


Fig. 6. Diagrama de correlación K vs Mg

Fig. 7. Diagrama triangular Na-K-Mg<sup>1/2</sup>

|    | TNA/K<br>TON | TNA/K<br>FOUR | TCa/K  | TCa/Na | TZ     | TCHA   | TMSI   | TNAKCa | TNAKCaMg | T <sup>2</sup><br>°K |
|----|--------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------------------|
| 0  | +189.3       | +212.8        | +107.3 | +82.2  | -999.0 | -999.0 | -999.0 | +92.6  | +16.4    | +23.7                |
| 1  | +209.2       | +228.2        | +102.2 | +48.7  | +126.1 | +107.0 | +15.2  | +85.2  | +0.0     | +56.5                |
| 2  | +204.8       | +224.4        | +104.8 | +53.0  | +125.2 | +106.1 | +14.5  | +88.4  | +0.0     | +56.5                |
| 3  | +139.4       | +173.9        | +76.7  | +57.7  | +117.5 | +98.8  | +6.0   | +83.9  | +0.0     | +55.3                |
| 4  | +124.8       | +239.1        | +111.4 | +54.7  | +120.3 | +101.5 | +10.4  | +95.9  | +35.6    | +60.5                |
| 5  | +203.1       | +223.2        | +117.1 | +70.0  | +149.8 | +129.5 | +35.1  | +176.3 | +49.0    | +64.4                |
| 6  | +182.1       | +207.3        | +107.7 | +65.6  | +130.1 | +110.8 | +18.5  | +94.9  | +0.0     | +58.2                |
| 7  | +229.3       | +242.3        | +110.9 | +52.5  | +129.2 | +109.9 | +17.6  | +94.8  | +0.0     | +61.7                |
| 8  | +189.0       | +212.6        | +119.3 | +78.9  | +148.4 | +128.1 | +33.6  | +173.1 | +0.0     | +64.3                |
| 9  | +199.1       | +219.4        | +114.8 | +68.9  | +151.2 | +130.8 | +36.3  | +173.6 | +48.5    | +63.7                |
| 10 | +213.8       | +231.1        | +130.6 | +84.1  | -999.0 | -999.0 | -999.0 | +186.5 | +54.5    | +86.9                |
| 11 | +253.7       | +259.7        | +119.0 | +55.3  | +119.3 | +100.5 | +9.5   | +191.6 | +47.1    | +75.9                |
| 12 | +219.4       | +235.2        | +107.6 | +51.8  | +119.8 | +101.0 | +10.0  | +91.2  | +45.0    | +66.2                |
| 13 | +236.9       | +247.8        | +115.1 | +55.5  | +126.4 | +107.2 | +15.4  | +185.0 | +34.3    | +71.5                |
| 14 | +239.8       | +249.9        | +117.3 | +57.3  | +128.0 | +108.8 | +16.8  | +186.9 | +31.9    | +71.3                |
| 15 | +244.5       | +253.2        | +115.0 | +53.0  | +121.4 | +102.5 | +11.3  | +99.3  | +33.4    | +69.7                |
| 16 | +280.9       | +278.3        | +130.6 | +61.6  | +130.5 | +111.1 | +18.9  | +204.9 | +36.5    | +81.5                |
| 17 | +273.2       | +273.2        | +127.8 | +60.3  | +124.5 | +105.4 | +13.8  | +191.4 | +31.9    | +78.7                |
| 18 | +257.8       | +262.5        | +115.3 | +49.5  | +120.6 | +101.7 | +10.6  | +98.6  | +41.6    | +70.2                |
| 19 | +276.2       | +275.3        | +145.1 | +80.9  | +144.3 | +124.2 | +30.4  | +211.5 | +75.0    | +99.5                |
| 20 | +264.0       | +266.8        | +129.6 | +65.3  | +137.0 | +117.3 | +24.3  | +200.0 | +56.2    | +85.4                |

ra efectuar estos cálculos geotermométricos han sido utilizadas las funciones siguientes:

a/K Ton, TCa/K, TCa/Na: Tonani (1980)

a/K Four: Fournier (1979)

z, Tcha: Arnorsson et al. (1983)

si: Fournier (1981)

a-K-Ca: Fournier and Truesdell (1973)

}-K-Ca-Mg: Fournier and Potter (1979)

/Mg: Giggenbach et al. (1983).

En la Fig 5 se observa que las aguas cloruradas tienen un contenido de sílice menor que el de saturación respecto a la sílice amorfa o que la componente cloruro sódica pura sea en saturación respecto a los minerales menos solubles (cuarzo, o calcedonia).

En la Fig 6 las muestras de Quebrada Lava definen una alineación que es la expresión del fenómeno de mezcla entre la componente cloruro sódica y las aguas someras. Un modelo de mezcla binario, fundamentado sobre el geotermómetro  $K^2/Mg$  y la función de solubilidad de la calcedonia indica que la componente cloruro sódica pura tendría una temperatura de equilibrio de 120-125°C (ICE-INEL, 1989).

En el gráfico triangular Na-K-Mg<sup>1/2</sup>, los círculos se refieren a las condiciones de equilibrio entre la solución acuosa y la paragénesis hidrotermal albita, microclina, illita, clorita, calcedonia según Giggenbach (1986, 1988). En otras palabras estos círculos son los lugares de intersección de las isotermas Na/K (Fournier, 1979) con las correspondientes isotermas  $K^2/Mg$  (Giggenbach et al., 1983). En el mismo diagrama el retículo define las condiciones de equilibrio global según Chiodini et al. (1990), para temperaturas de 150-300 °C. Para  $T < 150^\circ C$  no ha sido calculada la composición de la solución acuosa porque la paragénesis de equilibrio no es fácilmente definible.

Las aguas termales de Quebrada Lava (las más representativas de la componente cloruro sódica) definen una alineación que deja el vértice del magnesio (donde se localizan comúnmente las aguas frías de bajo TDS), pero sin acercarse a la zona de las soluciones hidrotermales que satisfacen las condiciones de equilibrio. En otras palabras, estas aguas podrían ser clasificadas como inmaduras según Giggenbach (1988). Por otro lado, hay que subrayar que la posición de la componente cloruro sódica pura calculada con base en el modelo de mezcla mencionado anteriormente, indicaría un grado de maduración intermedio, típico de las aguas parcialmente equilibradas como, por ejemplo, las que se localizan en las porciones periféricas de los sistemas geotérmicos de alta entalpía.

La razón Na/K indica temperaturas de equilibrio mucho más elevadas, próximas a los 270°C. Aceptando esta indicación como verdadera, la diferencia entre la temperatura de equilibrio  $K^2/Mg$   $SiO_2$  y la de Na/K indicaría que en el curso de la migración de la solución acuosa hidrotermal desde el reservorio hacia el lugar de descarga a la superficie no haya ocurrido un simple fenómeno de mezcla, sino también fenómenos de re-equilibración, que han sido memorizados por la razón  $K^2/Mg$  y por el contenido de sílice.

## Isótopos estables del agua:

Datos de oxígeno-18 y deuterio han sido proporcionados por ICE-ENEL (1989) para las tres manifestaciones termal del área y para una naciente fría localizada cerca de las fuentes termal de Quebrada Lava. Todas estas aguas tienen características isotópicas similares y muy pesadas, lo que indica una procedencia Caribe de las aguas meteóricas involucradas en su alimentación y una probable alimentación local del circuito hidrotermal.

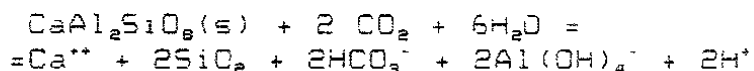
La ausencia de 'oxygen shift' apreciable en las manifestaciones termal es probablemente debida al elevado grado de mezcla con aguas someras.

## Modelo Geoquímico:

En su conjunto, las observaciones presentadas permiten adelantar el siguiente modelo geoquímico:

Un acuífero hidrotermal con una temperatura próxima a los 270°C se localiza en el subsuelo del área del volcán Arenal. Su alimentación está asegurada por precipitaciones meteóricas locales. Como es reconocido en otros sistemas hidrotermales localizados en contextos volcánicos-magmáticos (Giggenbach, 1988), la absorción de gases magmáticos ácidos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HF}$ ) en las aguas meteóricas que infiltran en profundidad origina muy probablemente soluciones acuosas fuertemente ácidas que, interactuando con las rocas, se neutralizan en la zona de transición entre el sistema magmático profundo y el sistema hidrotermal sobreyacente. Las soluciones acuosas se vuelven así cloruro sódicas mientras como gases disueltos quedan el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$ .

Estas soluciones acuosas ascienden hacia la superficie a lo largo de zonas de elevada permeabilidad vertical (fallas, fracturas) y sufren unos cambios composicionales importantes. El anhídrido carbónico originalmente disuelto en la fase líquida presente en profundidad se transforma en larga medida en bicarbonato, por interacción con las rocas, según reacciones como la siguiente:



Este proceso determina también un incremento de los contenidos de los metales alcalino-térreos que prevalecen sobre los metales alcalinos en las rocas del área (Bigot, 1982; ICE-ENEL, 1989). El enfriamiento de la solución permite la adquisición de calcio y magnesio porque la solubilidad de los carbonatos de Ca y Mg aumenta con la disminución de la temperatura. Además la solución acuosa puede enriquecerse de



sulfato porque también la solubilidad de la anhidrita aumenta con la disminución de la temperatura. Por otra parte, el contenido de sílice disminuye, por la menor temperatura. Por otra parte, el contenido de sílice disminuye por la menor solubilidad de los minerales de la sílice. Las nuevas condiciones de temperatura encontradas en el trayecto entre el reservorio hidrotermal y la superficie son memorizadas por la razón  $K^2/Mg$  y por el contenido de sílice, mientras la razón  $Na/K$  parece indicar las condiciones térmicas del reservorio hidrotermal. Finalmente en proximidad de la superficie ocurre el fenómeno de mezcla con la aguas bicarbonato alcalino térreas.

Los procesos secundarios que ocurren entre el reservorio hidrotermal y la superficie afectan en forma diferente las aguas de las tres manifestaciones termales del área, entre las cuales la de Quebrada Lava es la más representativa de la solución acuosa procedente de lo profundo.

Este modelo geoquímico, ya definido por ICE-ENEL (1989) es fundamentalmente diferente de lo propuesto por otros autores (Bigot et al. 1982; Bigot 1986; Bigot y Barquero, J. 1986; Barquero, R. 1989), que reconocen un sistema de circulación de subsuperficie, debido a la impermeabilidad de los depósitos volcánicos prehistóricos afectados por la alteración climática. Sin embargo, esta hipótesis difícilmente explica ya sea la limitada acidez o la composición de las aguas termales.

### Conclusiones y recomendaciones:

A la luz del modelo geoquímico discutido, los cambios en los contenidos de los solutos iónicos eventualmente experimentados por las manifestaciones termales del área reflejan, muy probablemente, variaciones en las condiciones termodinámicas del acuífero hidrotermal o del sistema de alimentación de las mismas manifestaciones aguas abajo del acuífero hidrotermal. Al contrario, es poco probable que tales cambios sean en relación con variaciones en el estado de actividad del sistema volcánico-magmático. Se sugiere la extensión del monitoreo hidrogeoquímico a unas especies gaseosas disueltas, entre las cuales el radón podría jugar un papel de interés para fines de vigilancia.

Por otro lado, la presencia de un sistema hidrotermal en un área volcánica tan activa, implica otro tipo de peligro, debido a la posible ocurrencia de explosiones freáticas o freatomagmáticas. Para la evaluación de este tipo de riesgo sería muy útil, si es posible, aplicar la metodología geotermométrica-geobarométrica de Chiodini y Cioni (1989). Esta técnica ha permitido apreciar la presencia de condiciones

termodinámicas críticas antes de la explosión freática que tuvo lugar el 15 de abril de 1990 en el cráter del volcán Guagua Pichincha (Ecuador)

Sería de utilidad efectuar una campaña geoquímica más detallada con el objeto de localizar otras manifestaciones termale de interes, extender el muestreo de las aguas a otros sitios, efectuando también determinaciones de especies gaseosas disueltas, sobre todo radón y también recolectar, si es posible, muestras de gases libres para análisis que incluya por lo menos  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  y  $H_2$

#### Agradecimientos:

Se agradece la cooperación del Departamento de Geología del Instituto Costarricense de Electricidad y al personal profesional y técnico de apoyo de la Oficina de Sismología y Vulcanología y del Laboratorio Químico del ICE que hicieron posible esta investigación. En particular se agradece al asistente Francisco Arias por su preocupación en la recolección de las muestras en el campo

#### Referencias:

- Arnorsson, S., Gunnlaussón, E., Svavarsson, H. 1983: The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim Cosmochim. Acta*, 47, 567-577
- Barquero, R. 1989. Estudio geoquímico preliminar de fuentes termale y frías del Volcán Arenal. *Bol. Obs. Vulc. Arenal* 3, 38-55
- Bigot, S. 1986. Etude hydrogeochemique du volcan Arenal (Costa Rica). Contribution de l'activité eruptive. *Bull. PIRPSEV* 115, 39 p.
- Bigot, S., Barquero, J. 1986. Estudio hidrogeoquímico del volcán Arenal. Contribución a la actividad eruptiva. *Bol. de Vulc.*, 17, 7-13
- Bigot, S., Barquero, J., Malavassi, E. 1982. Vigilancia hidrogeoquímica del volcán Arenal. *Bol. de Vulc.*, 12, 2-7
- Chiodini, C., Dioni, R. 1989. Gas geobarometry for hydrothermal system and its application in various Italian geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 4, 465-472

Chiodini, C., Cioni, R., Guidi, M., Marini, L. 1990. Chemical geothermometry and geobarometry in hydrothermal aqueous solutions: a theoretical investigation based on a mineral-solution equilibria model. Submitted to *Geochim Cosmochim Acta*

Fournier, R. O. 1979. A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geothermal Resources Council Transactions*, 3, 221-224

Fournier, R. O. 1981. Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In L. Rypbach and L. J. P. Muffler (editors) *Geothermal systems: principles and case histories*. J. Wiley and Sons, N.Y. pp 109-143

Fournier, R. O., Potter, R. W. II 1979. Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochim Cosmochim Acta*, 43, 1543-1550

Fournier, R. O., Truesdell, A. H. 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim Cosmochim Acta*, 37, 1255-1275

Giggenbach, W. F. 1986. Graphical techniques for the evaluation of water/rock equilibrium conditions by use of Na, K, Mg and Ca content of discharge waters. *Proc. Eighth New Zealand Workshop*, 37-44

Giggenbach, W. F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim Cosmochim Acta*, 52, 2749-2765

Giggenbach, W. F., Gonfiantini, R., Jang, B. L., Truesdell, A. H. 1983. Isotopic and chemical composition of Parbati Valley geothermal discharges, Northwest Himalaya, India. *Geothermics*, 12, 199-222

Guidi, M., Marini, L., Scandiffio, G., Cioni, R. 1990. Chemical geothermometry in hydrothermal aqueous solutions: the influence of complexing. *Geothermics*, 19, 415-441

ICE-ENEL 1989. Estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmica en la República de Costa Rica. Fase I. Estudio de reconocimiento. Informe final. Proyecto COS/83/t01/a/71/99

Langellier, W. F., Ludwig, H. F. 1942. Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *JAWWA*, vol 34, 335

Tonani, F. 1980. Some remarks on the geochemical techniques in geothermal exploration. In *Adv. Eur. Geoth. Res. Proc. Second Int. Symp.*, Strasbourg, pp 428-443